

強地震動を受ける鋼製橋脚の構成補剛板の座屈波形、 および塑性ひずみの累積現象について

岡田 潤¹，北田 俊行²，山野 敏郎³

¹ 大阪市立大学大学院 工学研究科土木工学専攻前期博士課程 (〒558-8585 大阪市住吉区杉本 3-3-138)

² 工博 大阪市立大学教授 工学部土木工学科 (〒558-8585 大阪市住吉区杉本 3-3-138)

³ 日本構研情報(株) 構造解析室 (〒541-0051 大阪市中央区備後町 1-5-2)

Dealt with in this paper is the seismic behavior and its analysis of steel bridge piers consisting of single columns with stiffened box cross section subjected to strong earthquakes like the Hyogo-ken Nanbu Earthquake. A computer program USSP-D has been already developed by the authors for predicting the elasto-plastic, finite displacement and dynamic response of steel bridge piers idealized into a vibration system with single mass by considering the local buckling of the stiffened plate or shell panels and the column buckling of the piers. First of all, the characteristic of the buckling modes and the cumulative phenomenon of plastic strain is investigated. Then, a method for estimating the seismic behavior of steel bridge piers through a static analysis by using proper cyclic displacement is also discussed.

Key Words : *elasto-plastic and dynamic response analysis, steel bridge pier, local buckling, finite element method, seismic behavior*

1. まえがき

本研究においては、一自由度系振動体としてモデル化された鋼製橋脚の柱としての座屈と構成板パネルの局部座屈とを考慮した弾塑性動的応答を解析し得る既開発プログラム USSP-D¹⁾を用いて、パラメトリックな解析を行なう。なお、このプログラム USSP-D は、補剛板構造の弾塑性有限変位解析のための専用プログラム USSP²⁾と、文献3)で開発された差分法による1質点系の動的解析サブルーチン FDDA1 とを組み合わせた弾塑性動的応答解析プログラムである。このパラメトリック解析により、鋼製橋脚の強地震下における構成補剛板の座屈波形の特性、および塑性ひずみの累積現象を明らかにすることを本研究の目的としている。

まず、実際の橋脚モデルを対象にして、USSP-D による動的応答解析で得られた最大応答変位を、同一モデルに静的な荷重した場合の構成補剛板の座屈波形および垂直ひずみ分布と、動的応答解析によるそれらとの差異について比較・検討を行っている。

つぎに、動的応答解析によって得られた応答変位を静的な一方向への漸増変位、あるいは繰返し変位として与え、両解析結果を比較することにより、静

的解析のみで動的挙動が定量的に評価できるか否かの可能性についても考察を加えている。

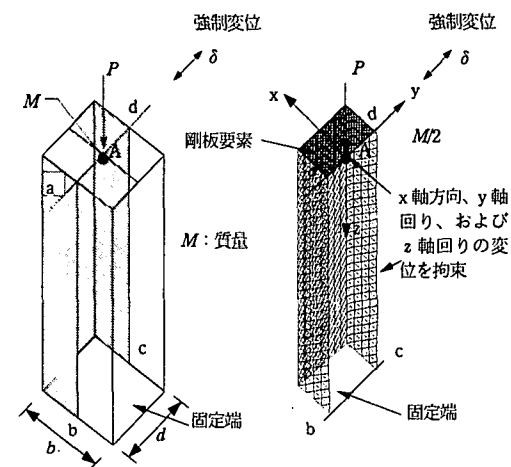
2. 解析モデル

プログラム USSP-D のための解析モデルとして、図-1(a)に一例を示す、上端の節点 A に集中質量 M を有する補剛箱形断面片持柱を対象とした。

いま、図-1(b)に示すように、対象とした柱の構造、載荷荷重、および、たわみ波形の対称性を利用して、対象柱から断面方向に1/2の部分を取り出し、プログラム USSP のための解析モデルを設定した。そして、載荷断面内の節点が従属している独立節点 A を剛板要素上に設ける。独立節点 A には、上部構造の自重を想定した一定の軸方向圧縮力を載荷した状態で、水平方向 (y 軸方向)に地震動に伴う応答変位を各時間ステップごとに入力した。

一方、この解析モデルは、独立節点 A を質点とみなして、振動解析のための一自由度系モデル化とした。

なお、本研究で用いた解析モデルは、文献4)で用いられた解析モデル d-m と同じもので、その断面



(a)対象とした補剛箱形断面柱 (b)補剛箱形断面の1/2の解析モデル

図-1 USSP-Dで用いる解析モデル

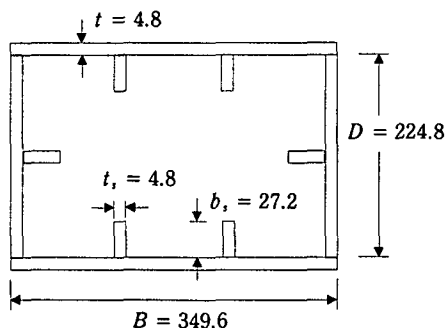


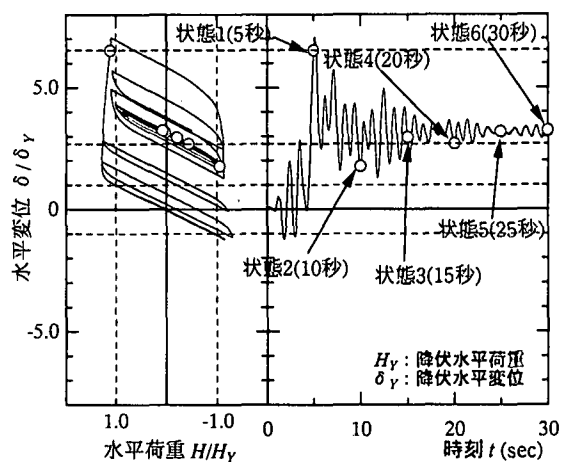
図-2 解析モデルの断面 (単位: cm)

表-1 解析モデルの諸元

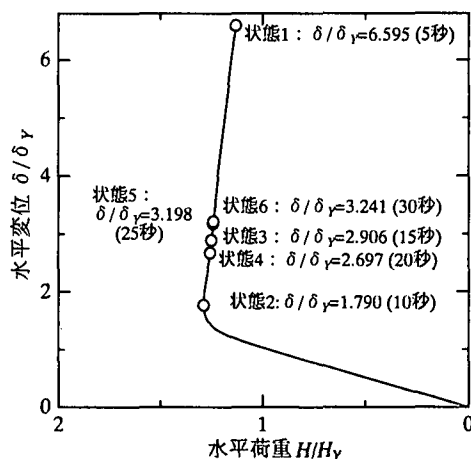
解析モデル	静的解析	応答解析
材質	SS400	SS400
柱高さ(cm)	1,477.6	1,477.6
補剛板全体の幅厚比パラメータ R_F	0.481	0.481
板パネルの幅厚比パラメータ R_R	0.292	0.292
縦補剛材剛比 γ/γ^*	3.0	3.0
横補剛材間隔 a (cm)	168	168
細長比パラメータ $\bar{\lambda}$	0.378	0.378
軸方向力比 P/N_p	0.113	0.113
ヤング係数(N/mm ²)	2.06×10^5	2.06×10^5
ポアソン比	0.3	0.3
降伏点(N/mm ²)	308.7	308.7
降伏水平荷重 H_y (kN)	9,439.2	9,439.2
降伏水平変位 δ_y (cm)	8.88	8.88
質量 M (N·s ² /cm)	22420.4	22420.4
減衰係数 C (kN·s/cm)	—	15.36
減衰定数 h	—	0.05
入力地震加速度	—	JR 鷹取
固有周期(s)	0.91	0.91

を図-2に、諸元を表-1に示す。

また、モデル化は、以下の仮定を考慮して行った。



(a) 応答解析結果



(b) 静的解析結果

図-3 応答解析結果および静的解析結果

- (i) 応力-ひずみ関係: 引張試験結果より、降伏棚を有するトリリニア形に近似する。
- (ii) 硬化則: 移動硬化率を 100% に設定し、等硬化は発生しないものと仮定する。
- (iii) 初期不整: 今回の解析では、無視する。
- (iv) 入力地震加速度: 兵庫県南部地震の際に JR 鷹取駅で観測された南北方向の地震加速度を入力する。

その他、詳細については、文献4)を参照されたい。また、このようにして作成した解析モデルの総節点数は 1,360、総要素数は 2,540 となった。

3. 解析結果

まず、座屈波形の特性、および塑性ひずみの累積現象を明らかにするため、USSP-D による弾塑性動的応答解析(以下、応答解析という)と、その際に得られた最大応答変位を同一モデルに静的に載荷した場合の USSP による解析(以下、静的解析という)とを行った。応答解析による水平荷重-水平変位曲線、および水平変位の時刻歴応答を図-3(a)に、また、静的解析による水平荷重-水平変位曲線を図-3(b)に示

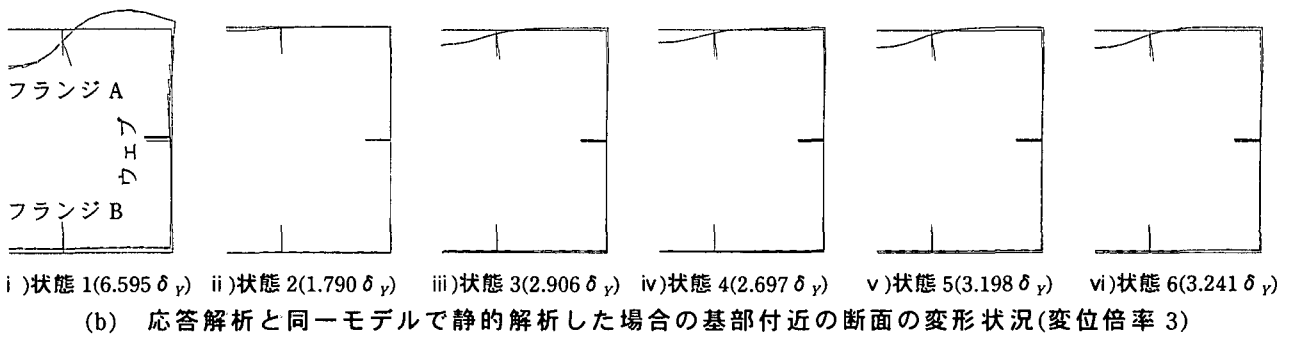
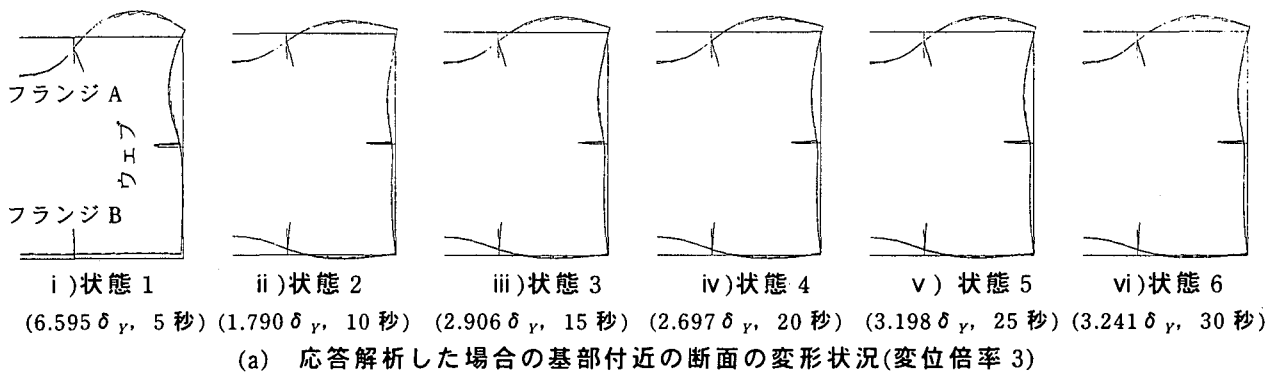


図-4 断面の変形状況における応答解析結果と静的解析結果との比較

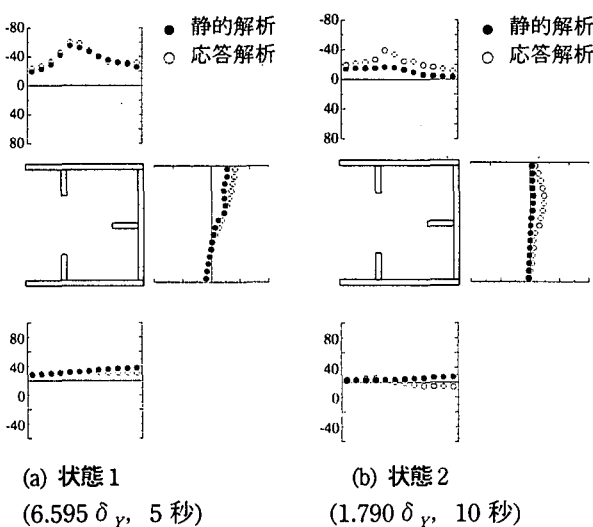


図-5 基部付近の垂直ひずみ分布における応答解析結果と静的解析結果との比較

す。さらに、状態 1～状態 6 における基部付近(柱基部から $1/2 \times$ 横補剛材間隔の高さ)の断面の座屈波形について、応答解析結果と静的解析結果とを比較して、図-4に示す。なお、図-3に示されている状態 1～状態 6 は、同図(a)において、 $t=5$ 秒(応答変位は $6.595 \delta_y$)、10 秒 ($1.790 \delta_y$)、15 秒 ($2.906 \delta_y$)、20 秒 ($2.697 \delta_y$)、25 秒 ($3.198 \delta_y$)、および 30 秒 ($3.241 \delta_y$) の状態を示している。同図 (b)には、応答解析により得られた上記 6 つの状態の応答変位を静的に載荷した変形状態を示している。図-4より、応答解析結果から最大応答変位が発生した状態 1 の座屈波形に着目すると、両解析結果において有意な差異は生じなかった。一方、著しい応答変位が繰返し作用した後の状態 2～状態 6 の座屈波形に着目すると、両解析結果において、以下のような差異が見られた。すなわち、静的解析結果による基部付近のフランジ B

は、ほとんど変形していない。ところが、応答解析結果による座屈波形に関しては、繰返し変位が作用しているため、フランジ B 側、およびウェブにも座屈変形が見られる。

つぎに、状態 1、および状態 2 において、基部付近の垂直ひずみ分布を図-5に示す。状態 1 に着目すると、有意な差異は見られず、両解析結果とも、フランジ A 側において、 $60 \varepsilon_y$ (ε_y : 降伏ひずみ)を超える最大垂直ひずみが発生している。ところが、状態 2 に着目すると、フランジ B において、ひずみが正負逆にてできているなど、応答変位の繰返し作用による有意な差異が認められる。

以上のことより、設計上、最も重要な値である最大応答変位が発生した状態 1 においては、静的解析と応答解析とによる座屈波形、および垂直ひずみ分布に有意な差異は発生しなかったことがわかる。その理由として、本解析では、入力地震加速度として、タイプ II、すなわち内陸直下型の地震波を採用した。その関係で、一度目の著しい応答変位で、最大応答変位が発生した。すなわち、応答変位の繰返し作用による影響が少なかったためと考えられる。仮に、タイプ I の地震加速度を入力した場合、つまり、著しい応答変位が複数回発生したのちに、最大応答変位が発生するような地震加速度を与えた場合、最大応答変位に静的解析結果と応答解析結果とで有意な差異が発生するものと予想される。そのことは、累積現象による差異が認められる状態 2～状態 6 の座屈変形、および垂直ひずみ分布から明らかである。

さらに、応答解析の入力地震加速度を JR 鷹取駅で観測された地震加速度の 0.5 倍、1 倍、1.5 倍、および 2 倍した場合の 4 ケースについて、弾塑性動的応答解析を行った。解析結果である水平変位の時刻歴応答を図-6に、各ケースの最大応答変位 δ_{max} および残留変位 δ_R をまとめたものを図-7に示す。同図より、振幅のみ

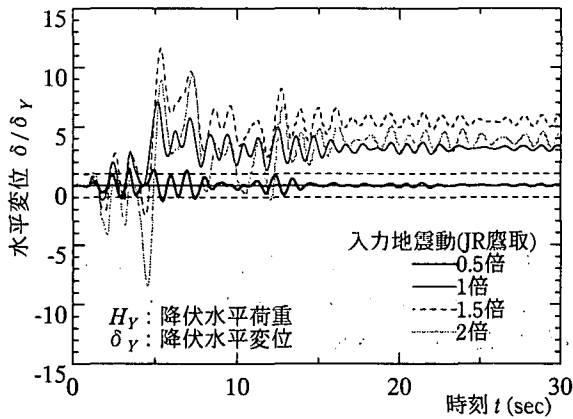


図-6 水平変位の時刻歴応答

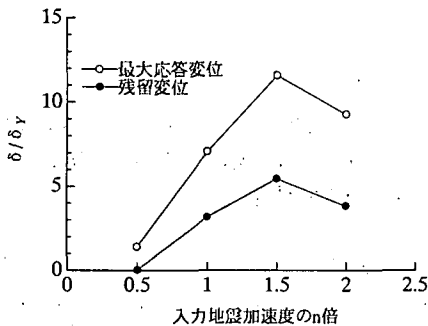


図-7 最大応答変位および残留変位

が異なり、その他は全て同じ地震加速度を入力した場合においても、最大応答変位と地震加速度の振幅との間の関係が線形でないことがわかる。

最後に、応答解析によって得られた応答変位を用いて、その挙動を静的な繰返し変位によって定量的に評価する手法について模索する。そこで、上記の入力地震加速度がJR 鷹取駅で観測されたものの2倍にした解析モデルについて、検討してみる。その応答変位は、図-6に示されているように、4.5秒で負側に著しく大きな値 $-8.450 \delta_y$ が発生した後、5.3秒で正側に著しく大きな値 $8.908 \delta_y$ が発生している。そこで、(i)静的解析により $8.908 \delta_y$ の水平変位を載荷した状態、(ii)静的解析により負側に $-8.450 \delta_y$ の水平変位を載荷した後に、正側に $8.908 \delta_y$ の水平変位を載荷した状態、および(iii)応答解析により $8.908 \delta_y$ の応答変位が得られた状態($t=5.3s$)の3ケースにおける柱基部付近の垂直ひずみ分布を図-8に示す。この図のフランジAのひずみ分布より、その最大垂直ひずみに着目すると、(i)の載荷方法による静的解析により得られた最大垂直ひずみの方が、(iii)の応答解析によって得られた最大垂直ひずみに近くなる。一方、フランジ全体のひずみ分布波形に着目すると、(ii)の載荷方法による静的解析の方が、(iii)の応答解析を行った場合のひずみ分布波形に近くなる。以上のように、本研究においては、応答解析により得られたひずみ分布を、静的な解析により、精度良く評価することができなかつた。

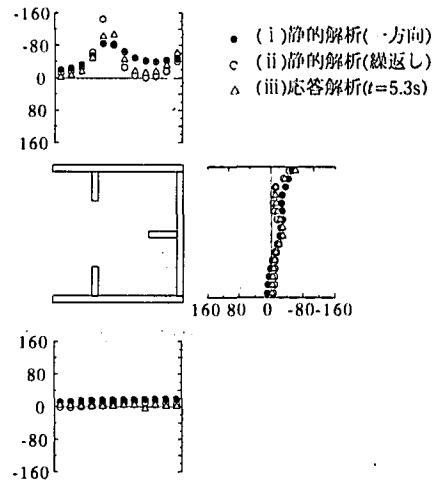


図-8 ひずみ分布の比較

4. まとめ

本解析における主な成果をまとめると、以下のとおりである。

- i) 大きな応答変位が繰返し発生していない応答状態において、変形状況および垂直ひずみ分布をみると、応答解析結果と静的解析結果との間に有意な差異が見られなかつた。
- ii) 一方、大きな応答変位が繰返し発生した後の応答状態において、変形状況および垂直ひずみ分布をみると、応答解析結果と静的解析結果との間に有意な差異が見られ、塑性ひずみの累積現象が確認された。
- iii) 振幅のみ異なり、その他は同じ地震波による応答解析を行った場合、最大応答変位および残留変位と地震加速度の振幅との間の関係が線形でないことがわかつた。
- iv) 本研究においては、応答解析により得られた最大応答値およびひずみ分布を、静的な解析により、精度良く評価することができなかつた。

参考文献

- 1) 北田俊行, 中井 博, 狩野正人, 岡田 潤: 単柱形式の鋼製橋脚の局部座屈を考慮した弾塑性動的応答解析法の構築, 第2回鋼構造物の非線形数値解析と耐震設計への応用に関する論文集, 土木学会, pp.255-262, 1998年11月。
- 2) USSP 研究会: USSP ユーザーズ・マニュアル, 理論編, Ver. 3.0, 日本構研情報(株), 1996年10月。
- 3) 中井 博, 北田俊行, 中西克佳: ハイブリッド実験システムを用いた鋼製・合成柱の耐荷性および耐震性に関する研究, 大阪市立大学工学部紀要・震災特別号(別冊), pp.131-148, 1997年1月。
- 4) 岡田 潤, 北田俊行, 山野敏郎: 地震荷重を受ける薄肉鋼製橋脚の変形性能に及ぼす縦補剛材剛比の影響, 第3回鋼構造物の非線形数値解析と耐震設計への応用に関する論文集, pp.69-76, 2000年1月。